

# 黑洞面面观

张 怀 德

(山东德州学院物理系 山东 253023)

黑洞是目前物理学和天文学研究的一个热点。黑洞性质涉及到物理学的基本规律和时空属性, 现有的发现暗示人们: 热力学与时空性质之间可能存在着深刻的内在联系, 对黑洞理论的进一步探索有可能导致物理学的另一场革命。因此自 20 世纪 60 年代以来, 黑洞研究吸引了越来越多的爱好者的注意。特别是自 1973 年霍金发现黑洞存在热辐射之后, 黑洞理论已发展为一个包括量子论、相对论、统计物理、天体物理和微分几何在内的多学科理论, 黑洞研究已成为多学科的交叉点。

## 黑洞的形成

黑洞是如何形成的呢? 我们知道: 通常的恒星是靠万有引力的吸引效应将物质聚集在一起。同时恒星内部的热核反应所产生的大量热能造成粒子的剧烈运动而形成排斥效应, 当这两种效应势均力敌时, 恒星维持平衡不会发生塌缩。随着热核反应能量的逐渐耗尽, 恒星会慢慢冷却下来, 万有引力造成的吸引效应最终将压倒排斥效应使恒星发生塌缩。原子的壳层将被压碎, 形成原子核在电子海洋中的漂浮状态。这时电子之间的斥力抵抗不住恒星自身的引力时, 恒星将塌缩至密度非常高的地步。质量小于 1.4 个太阳质量的恒星在冷却的时候将依靠电子之间的泡利斥力抵挡住自身的万有引力, 不再进一步塌缩, 从而形成白矮星。如果恒星的质量大于 1.4 个太阳质量, 这种斥力将抗不住恒星自身的引力, 恒星将进一步塌缩下去, 所以 1.4 个太阳质量是一个界线, 被称为钱德拉塞卡极限。奥本海默认为: 质量大于钱德拉塞卡极限而继续塌缩的恒星, 电子将被压入原子核中, 与核里的质子形成中子。如果此星的质量不超过 3—4 个太阳质量(奥本海默极限)则中子之间的斥力将支撑住星体不再塌缩, 从而成为中子星。如果恒星质量超过了奥本海默极限, 则没有任何力量能抵挡住强大的引力, 星体将塌缩到自身的引力半径之内, 形成黑洞。

从超新星爆发的角度来看, 星体塌缩是一种非常猛烈的过程, 爆炸崩掉了恒星的外壳, 同时产生指

向星体中心的巨大压力, 使星体的中心部分形成黑洞。

除去恒星塌缩外, 形成黑洞还有其他途径。例如, 在星系的中心聚集着亿万颗太阳和别的物质, 在演化过程中很可能发生物质收缩和恒星间的碰撞, 从而形成巨大质量的星系级黑洞。

宇宙早期, 物质密度极高。密度的涨落使某些小区域的物质聚集在一起也可形成小黑洞, 这类小黑洞温度很高, 有明显的热辐射。

## 黑洞的构造特点

最简单的黑洞是球对称的, 称为史瓦西黑洞。

史瓦西黑洞在引力半径  $r_g = \frac{2GM}{c^2}$  处( $c$  为光速)形成一张奇异的球面, 是黑洞的边界称为视界在这个视界面处, 引力强大到要使物质逃离黑洞, 必须具有无穷大的速度。这种强引力场意味着物质的高度密集, 按着黑洞的形成条件, 半径为 6400 千米的地球, 形成黑洞时只有乒乓球大小; 半径为 70 万千米的太阳形成黑洞时, 半径也只有 3 千米。密度高达 100 亿吨/每立方厘米。在视界以外, 可以由光信号在任意距离上相互联系, 这就是我们所居住的正常宇宙; 而在视界以内, 光将发生无穷大的红移, 实际上是完全消失掉了。所以越过视界面进行交往是不可能的。黑洞外部无法得到来之黑洞内部的任何信息。

在  $r = 0$  的中心处, 存在着一个奇点。从广义相对论的角度来看, 奇点是时空弯曲十分厉害的地方。时间方向指向  $r = 0$  的奇点处。这样等  $r$  面便是“单向膜”区。任何进入黑洞的物质只能朝着  $r$  减小的方向运动, 不能停留, 也不可能反向运动, 没有任何力量可以抗拒这种运动而黑洞的视界面只是单向膜区的起点。由于任何物质都不能在单向膜区停留, 所以单向膜区处于真空状态。而  $r = 0$  的奇点处不是黑洞的球心, 而是时间的终点。在这里所有物质都被无限压缩, 时空被无限弯曲。所以黑洞的结构就是包在视界里的一个奇点。同时黑洞又是一种极其简单的物体, 它几乎不保持形成它的物质所

具有的任何复杂性。它对前身物质的形状或成分都没有记忆。它保持的只是质量、角动量和电荷。这种消繁归简是黑洞最基本的特征。

黑洞是任何物体都能掉进去就再也出不来的星体。按着广义相对论, 还应存在白洞。白洞是黑洞的时间反演。它的内部也是单向膜区只不过时间方向是从奇点  $r=0$  处指向视界  $r=r_g$  处。所以它的单向性与黑洞相反, 白洞可以把内部的一切物质都抛出来。

### 黑洞的探测

既然黑洞与外界失掉了任何信息, 又如何探测黑洞的存在呢? 其中一种重要的手段就是选择那些即没有周期性也不是再发的  $x$  射线双星系统。当黑洞和一颗明亮的恒星组成双星系统时, 我们虽然看不见小而黑的黑洞, 但却能看到它的明亮伴星。由于亮星与黑洞围绕它们的共同重心旋转, 我们就可以确认亮星有一个暗伴星, 而且可以算出暗星的质量。如果暗星的质量大于太阳质量的 3—4 倍, 则这颗暗星就有可能是黑洞。

亮星围绕重心的转动, 可以通过多普勒效应看出。当亮星朝向我们运动时, 它的光谱线会有紫移, 远离我们运动时, 光谱线会有红移。这样的双星系统中的暗星有可能是黑洞。由于黑洞会从亮星中吸出气体, 这些气体围绕黑洞旋转, 形成一个圆盘称为吸积盘。气体在盘内沿螺线掉进黑洞, 就像旋涡中的水一样。气体在向黑洞下落的过程中, 会释放出大量的热能, 使温度越来越高, 并发出辐射。发光的吸积盘就成了光源。气体将从亮星表面处的 1 万度升高到进入黑洞时的大约 1 亿度。从而发射出很强的 X 射线暴或喷流, 这就是 X 射线双星。当 X 射线双星中暗星的质量大于奥本海默极限时, 那么这个暗星就可能是一个黑洞。

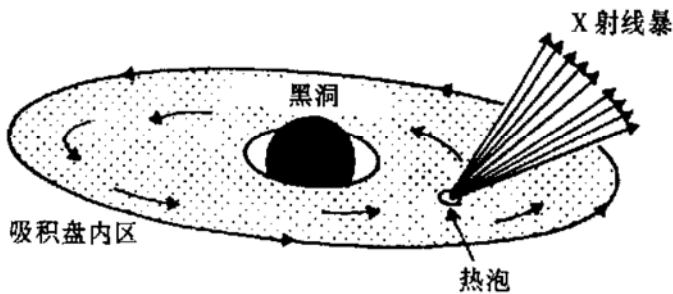


图 1 黑洞周围的吸积盘

距离我们 8000 光年的天鹅座 X-1 就是这样一个 X 射线双星系统。其中亮星是一颗高温的蓝巨星, 质量约在 25 个太阳质量—40 个太阳质量之

间。它的暗伴星质量约为 7 个太阳质量超过奥本海默极限, 这颗暗伴星就是黑洞的候选者。

### 黑洞的分类

克尔黑洞: 除去最简单的史瓦西黑洞外, 还有一种转动的黑洞——称为克尔黑洞。克尔黑洞是旋转对称的。它的视界与无限红移面不再重合。而且有两个视界和两个无限红移面。两个视界是球对称的, 外无限红移面像一个橘子的外皮, 内无限红移面则像一个花生的外壳外视界与外无限红移面之间是

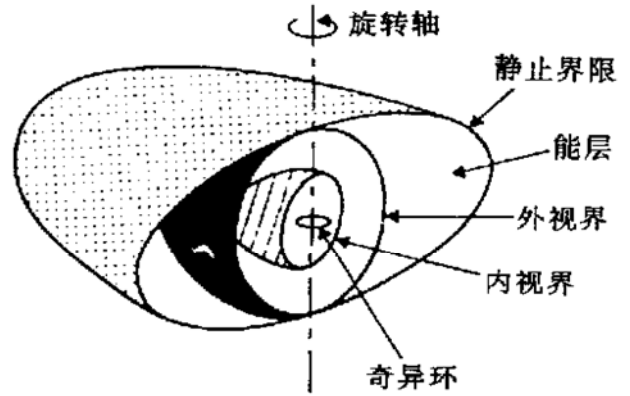


图 2 转动的黑洞

外能层区, 内视界与内无限红移面之间是内能层区。黑洞的中心存在着一个奇环。内外视界之间是时空坐标互换区——即单向膜区假如克尔黑洞越转越快, 其单向膜区就会越来越薄, 最后内外视界重合, 形成所谓“极端黑洞”。

极端黑洞——这种黑洞的单向膜区退化为一层膜, 如果再转的快一点, 这层膜就会消失视界没有了, 奇环裸露在外面。彭若斯认为: 极端黑洞产生的原因是: 克尔黑洞的奇环和内视界都是不稳定的, 稍有扰动就会变化, 封住内视界不允许任何物体进入。这就避免了进入黑洞内部的人“看见”奇环, 导致因果性不确定。

克尔-纽曼黑洞。这种黑洞不仅转动, 而且带电。其构造与克尔黑洞非常相似, 两个视界, 两个无限红移面, 两个能层, 中心有一个奇环。其视界、无限红移面、能层和奇环的形状也与克尔黑洞差不多, 惟一的区别是: 进入克尔-纽曼黑洞的物体不仅不能从奇环的上下方撞到奇环上, 也不能从奇环所在的赤道面上进入奇环, 奇环对一切方向上飞来的物体均有一股不可抗拒的排斥力, 把它们拒之于门外。

### 黑洞的激发

彭若斯研究发现, 克尔黑洞的能层中存在负能轨道。当一块具有能量  $E_1$  的物体进入能层分裂为两块, 一块沿负能轨道穿过外视界进入黑洞(以  $E_3$  表示)使

黑洞能量减少,减少的是黑洞的转动动能。另一块沿正能轨道跑出能层飞向远方(以  $E_2$  表示)。从能量守恒的角度看,飞向远方的物体  $E_2$  所具有的动能应大于入射物体的能量  $E_1$ ,其增加的能量应等于带入黑洞的负能  $E_3$  这一过程叫做彭若斯过程。

利用彭若斯过程可提取黑洞的转动能量。同时使黑洞的转动逐渐变慢。能层逐渐变薄,最后转动停下来。能层消失,克尔黑洞蜕化为不转动的史瓦西黑洞。

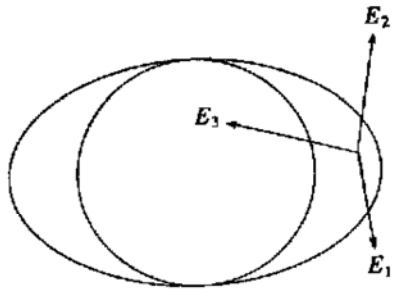


图3 彭若斯过程

美国物理学家米斯纳把彭若斯过程推广到量子态,他认为彭若斯过程对于电子、光子等微观粒子仍应成立。由于电子、光子具有波粒二象性,因此入射一定频率范围的波进入克尔黑洞能层,则出射波比入射波要强,这一过程就像激光,被称为米斯纳超辐射。重复进行米斯纳超辐,克尔黑洞也将蜕化为史瓦西黑洞。

俄罗斯物理学家斯塔诺宾斯基进一步发展了米斯纳的工作。他认为米斯纳超辐射是一种受激辐射,受激辐射与自发辐射之间有一种必然的联系。只要存在受激辐射,就应存在自发辐射。因此,不入射任何粒子或波进入克尔黑洞能层,克尔黑洞也会自发地辐射粒子和波。辐射的频率范围与米斯纳超辐射相同。这一过程也将导致克尔黑洞蜕化为不转动的史瓦西黑洞。

现在的研究表明:转动、带电的克尔-纽曼黑洞同样存在着超辐射和自发辐射。其过程中带走的不仅是黑洞的转动动能,还有黑洞的电磁能和电荷。不转动的带电  $R-N$  黑洞也会产生自发辐射和超辐射,带走的是黑洞的静电能和电荷,使其逐渐蜕化为不带电的史瓦西黑洞。可见即不带电又不转动的史瓦西黑洞可看作黑洞的基态。而转动的克尔黑洞,带电的克尔-纽曼黑洞以及带电不转动的  $R-N$  黑洞都可以看作黑洞的激发态。处于激发态的黑洞并不稳定,它们会通过超辐射,自发辐射及彭若斯过程甩掉自身的转动动能、电荷和电磁能,使自己回到基态。而基态的黑洞看来比较稳定。

### 黑洞的热性质

1972年物理学家霍金提出了黑洞“面积定理”证明了黑洞的面积随时间变化只能增加不能减少,

即  $\delta A = 0$  式子中  $A$  为黑洞的面积,这个定理认为:物质落入黑洞,或两个黑洞相撞等是导致黑洞面积增加的过程,是能够发生的。而黑洞分裂导致面积减少的过程是不可能发生的。这和热力学第二定律有些相似,热力学第二定律指出:自然过程中的熵只能随时间增加,不可能减少。

与此同时,以色列物理学家贝肯斯坦和斯马尔又各自独立的得出了关于黑洞的一个重要公式,这个公式把黑洞的一些参量组合成了类似于热力学第一定律的形式,即:

$$\delta M = \frac{k}{8\pi} \delta A + \Omega \delta J + V \delta Q$$

式子中的  $M, J, Q$  分别是黑洞的总质量、总角动量和总电荷。 $A, \Omega, V$  分别是黑洞的表面积、转动角速度和表面静电势。 $k$  为黑洞的表面重力。此公式与热力学第一定律的数学表达式:

$\delta u = T \delta s + \Omega \delta J + V \delta Q$  十分相似。式子中  $u, T, S$  分别是热力学系统的内能、温度和熵。比较这两个公式不难看出,黑洞的面积  $A$  确实对应着热力学系统中的熵,而黑洞的表面重力  $k$  非常像温度  $T$ 。不久,人们又研究出了黑洞的另外两个性质:即稳态黑洞的表面上表面重力  $k$  是常数。这和热力学第零定律的表述:处于热平衡的系统具有相同的温度  $T$  十分相似。

另外一个性质是:不能通过有限次操作使  $k$  降到零;这与热力学第三定律;不能通过有限次操作使温度  $T$  降到零相吻合。

1973年霍金、巴丁、卡特等声称:可以模仿热力学定律给出黑洞热力学的四条定律。霍金用量子场论的方法严格证明了黑洞有热辐射黑洞不断地吸积周围的物质和能量,同时又不断地向周围发出热辐射,所以黑洞是一颗具有生命力的星体。

### 黑洞研究展望

20世纪广义相对论预言了一朵烂灿的宇宙之花——黑洞。黑洞不是一颗死亡了的星体它有着丰富的内涵。它不仅有一般的力学性质而且有量子性质和热性质。黑洞有着充沛的生命力,它不是天体演化的最终归宿,而是天体演化的中间阶段。黑洞可以作为能源,它能够被提取的能量总额大得令人难以置信。

又一个新世纪来临之际,物理学再次处于重大变革之时,探索黑洞物理的奥秘,搞清楚黑洞理论的来龙去脉将是新变革的起点。